

기후시나리오 공간분해능 개선에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가

정유란, 이변우

서울대학교 식물생산과학부

Using downscaled climate scenario for improved impact assessment in crop production systems

Uran Chung and Byun-Woo Lee

Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

1. 서언

지난 2월 4일 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change-기후변동에 관한 정부간 패널)의 4차보고서 발표 후 최근 언론에서는 우리나라의 겨울이 80년 만에 한 달 짧아졌고, 지구온난화 추세를 훨씬 상회하는 평균 1.5°C 상승에 대하여 그대로 방치한다면 100년 뒤 한반도의 산림이 멸종 될 수 있다는 기사가 연이어 방송되었다. IPCC 4차보고서는 3차 보고서와 크게 다르지 않지만 4차 보고서에서 나온 수치들이 3차보고서의 예측치를 훨씬 넘어서고 있는데, 그 원인의 90%가 인간의 화석연료사용 때문이라고 하였다. 아울러 지구온난화로 인해 지구의 기온이 2100년에는 1.8-4.0°C 상승할 것으로 예상되었으며, 바다 수면도 최고 59cm까지 올라가 방글라데시 데카를 비롯한 저지대의 3억 인구는 비가 올 때마다 홍수를 겪을 것이고, 남아시아에선 농작물 생산량이 30% 급감할 것이라는 예측이 나왔다.

온도환경은 작물의 생육에서 가장 중요한 요소이지만, 고온현상은 작물의 생체반응과정에서 스트레스(stress) 요소로 작용한다. 미국의 경우, 1982년에서 1998년까지 점진적으로 발생한 기온변화가 옥수수과 콩의 수량에 영향을 준 것으로 나타났고(Lobell and Asner, 2003), 필리핀에서는 1992-2003년 동안 벼 생장기간에 기온이 1°C 증가함에 따라 벼 수량이 10% 감소한 것으로 밝혀졌다(Peng *et al.*, 2004). 또한 Yun and Lee (2001)에 따르면, 우리나라에 고온이 발생했던 1998년 벼의 출수기가 평년보다 8일 일찍 시작하여 약 5-17일까지 늦게 지속되었으며, 우리나라 봄철 개화시기가 20세기 후반에 들어 3-7일 정도 빨라졌다(이승범 *et al.*, 2003; 최광용과 권원태, 2003; 이승호와 이경미, 2004; Choi *et al.*, 2004). 공간적으로 지난 20세기 동안 보리의 재배 가능한계(Shim *et al.*, 2004)와 대나무 자연 군락지역(기상연구소, 2004b)이 북상하였으며, 이러한 기온상승 경향이 계속 유지된다면, 사과 재배가능 지역이 확대 될 것이라는 예측도 제시되었다(서형호, 2005).

기후변화를 감지할 수 있을 정도의 기상관측소는 종관기상관측망(synoptic observation network)에 속하며 관측소 간 거리가 평균 30km 이상이다. 하지만 기후변화의 충격을 직접 받는 농작물의 재배규모는 이보다 훨씬 작은 수 백 m 이내이며 대규모 농업지대에서도 대개 1km 미만이다. 당연히 기후정보도 같은 수준의 공간해상도를 가져야 하지만 현재의 역학적 규모축소기술(down-scaling) 수준에서 제공할 수 있는 기후변화 정보의 공간해상도는 종관망과 마찬가지로 30km 정도가 그 한계이다(권원태, 2004). 이를 극복하기 위해 다양한 공간내삽기법이 개발되어 왔으며, 이들 가운데 거리역산가중법(inverse

distance weighting, IDW)이 가장 흔하게 이용된다. 우리나라와 같이 지형의 기복이 심한 곳에서는 IDW에 의한 비관측점의 기온추정오차 가운데 가장 큰 부분이 해발고도의 편차에 의한 것이다. 따라서 추정에 사용된 지점들의 고도값으로부터 기온추정과 동일한 IDW 내삽에 의해 생성한 “가상지형”과, 비관측지점의 실제 고도간 편차를 구하여 기온감율을 보정해 주면 상당부분 개선이 이루어진다. 그러나 기상관측소의 위치가 대부분 도시지역으로서 도시열섬효과가 비도시 지역에도 동일하게 적용되어 시골지역의 추정기온이 실제보다 높은 쪽으로 왜곡되기 쉽다. 그 동안 도시열섬효과의 공간분포를 연속적인 모의시스템으로 구현하기 위해 여러 방법이 제시되었지만(Gallo *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2001; Gallo and Owen, 1999; Peterson *et al.*, 1999), 우리나라 상황에 적용하기에는 어려움이 많았다. 최근 국내에서 수행된 한 연구에서는 도시열섬효과의 공간적인 확산을 모의하기 위해 먼저 불연속적인 변량인 시군 행정구역단위 인구를 지표피복도 상의 시가지 픽셀에만 할당하여 규칙적인 격자점 단위의 평균인구로 변환함으로써 연속적인 변량인 수치인구모형 (digital population model, DPM)으로 표현하였다. DPM과 기온추정오차간 회귀식을 기존의 거리-고도 보정 내삽과정에 결합함으로써 1971-2000 평년 월별 일 최저기온의 추정오차를 기존에 비해 50% 이상 제거할 수 있었다(Choi *et al.*, 2003).

원래 농작물의 생육모의는 기후, 토양 등 환경조건이 동질적인, 혹은 한 개 기상관측소가 대표할 수 있는 지역에 한해 제한적으로 적용하고 있지만, 넓은 지역에 걸쳐 작물반응의 공간변이를 알아내기 위해서는 지리정보시스템(geographic information system, GIS)과의 결합이 불가피하다. GIS와 결합된 작물모형은 정밀농업 수준의 영농으로부터 한 국가나 지역의 작황진단에 이르기까지 광범위한 용도에 활용될 수 있다. 최근 수행된 연구에서 전국 1,455 읍면의 일별 최고 및 최저기온, 일사량, 강수량 자료를 기상청 56개 표준관측소 자료의 공간내삽에 의해 얻어, 1997-1999 기간의 읍면별 벼 수량을 계산한 결과 시군별 생산량이 농림부 보고자료와 높은 상관을 유지함을 보였다(Yun, 2003). 본 연구에서는 IPCC SRES(Special Report on Emissions Scenario, 2000)의 온실가스 증가시나리오에 의해 산출된 한반도 기후변화 시나리오자료를 작물생태계에 활용할 수 있도록 지리정보 시스템을 이용하여 공간해상도를 개선하였고, 우리나라 벼 재배지역을 대상으로 생육단계와 생산량을 2011-2100년간 모의하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 기후변화 시나리오 개요

기상연구소 기후연구실에서는 독일 막스 플랑크 기상연구소(Max Planck Institute for Meteorology, MPI)에서 도입한 대기-해양 결합모델(air-sea coupled climate model) ECHO-G를 240년간(1860-2100) 장기 적분하여 전지구 및 동아시아 지역(100-145°E, 20-50°N)의 기후변화를 전망하였다. 이것은 전구 기후모델에 의한 시뮬레이션 자료로써 우리나라와 같이 좁은 지역에 적용하는 것은 여러 가지 문제점이 있다. 우리나라는 지형이 복잡하고 남북으로 길게 위치하고 있으며 삼면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 지역차가 크다. 또한 기후모델에서 한반도 남부지역은 landuse가 바다로 표현되어 있어 전 지구모델의 결과를 직접 활용하기가 부적합하다. 그러므로 기후변화 시나리오를 우리나라에 적용하기 위해 고해상의 기후변화모델을 이용하거나 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)을 이용

하여 우리나라의 지형에 적합하도록 수정이 불가피 하다. 이에 기상연구소 기후연구실과 부경대학교는 공동으로 원래의 기후변화 모델(해상도 약 400km)을 지역기후모델로 MM5(PSU/NCAR Mesoscale Model)를 이용하여 역학적 규모축소(dynamic downscaling)를 실시하여 해상도가 25km인 한반도 기후변화시나리오를 산출하였다(기상연구소, 2003). 산출해낸 한반도 기후변화 시나리오 결과에 의하면, 우리나라는 기온은 2040년대에 비하여 2090년대에 크게 상승하였으며, 특히 북부지방의 상승이 뚜렷하다.

2.2 농경지 맞춤형 기후자료

2.2.1 기준 평년기후자료 작성

기상청 56개 지점(제주도, 울릉도 제외) 종관자료(일 최고/최저 기온의 월별 평균값)를 1971-2000년 30년 단위로 수집하였다. 56개소 기상관서의 해발고도를 이용하여 가상의 해발고도 표면을 생성하고 월별 기온감율값을 곱하여 해발고도 보정값을 생성하였다. 이 보정값을 IDW에 의해 추정된 초기 기온표면으로부터 감하여 고도편차가 보정된 월별 일 최고 및 최저기온 표면을 작성하였다(Yun, 2004). 일 최저기온에는 도시지역의 인구와 토지이용도를 동시에 고려함으로써 도시열섬효과를 정량적으로 표현할 수 있는 DPM을 기존 고도보정 기온 공간내삽모형과 결합함으로써 도시효과를 보정한 Choi *et al.*(2003)의 방법에 의해 작성하였다. 모든 기후자료는 공간해상도 270m의 ArcGIS9.1 Grid(ESRI Inc., USA) 파일로 저장하였다.

2.2.2 시나리오 기후자료 작성

기상연구소에서 25km 해상도로 제공한 온실가스 증가에 따른 한반도 기온 및 강수량 변화 시나리오(IPCC SRES A2 편차자료, 2011-2100)를 이용하여 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년의 30년 단위로 평균을 낸 후 ArcGIS9.1 Grid 파일로 변환하였다. 준비된 편차 평균 Grid를 270m 간격으로 re-sampling 하여 기준평년 기후도에 더해줌으로써 30년 단위 별 “미래 평년기후도”(월별 기온 및 강수량 분포)를 270m 해상도로 작성하였다.

2.2.3 공간평균 기후자료 작성

농작물 생육에 미치는 기후의 영향을 연구하고자 할 때 농경지의 규모와 그에 적합한 기후의 규모가 반드시 고려되어야 한다. 예를 들면 농작물의 생산량은 행정구역(시, 군 polygon) 단위로 집계되지만 기후자료는 기상관측지점(point) 단위로 얻어지므로 이들 간의 일대일 비교는 바람직하지 않다. 과거 60년 간 쌀의 생산은 전국 160여 개 시군에서 이루어졌지만 기후는 14개 지점에서만 관측되었다. 기존연구에서는 한 개 지점 기후자료에 주변 여러 시군의 생산량 자료를 대응시키거나, 기후자료를 보유하지 않은 시군의 생산량 자료는 아예 분석에서 제외하였다. 나아가 같은 시군 내에서도 기후의 공간변이가 존재하므로 수집된 기후자료가 시군 내 모든 농장의 기후를 대표하기는 더욱 어렵다. 이러한 “규모의 어긋남”을 극복하기 위해서 사용하는 방법이 기후의 공간내삽(spatial interpolation)이다(Dodson and Marks, 1997; Nalder and Wein, 1998). 최근 국내에서도 GIS, RS, GPS 등 발달된 공간정보기술과 실측에 입각한 소기후모형의 결합을 통해 공간기후학적 내삽기술이 크게 발전하고 있다(Yun, 2000). 이 기술에 의해 끊임 없이 연속적인 기후자

료를 복원해내면 귀중한 농작물의 생산통계자료를 버리지 않고 효율적으로 활용할 수 있게 된다.

국지기후 추정값의 정확도를 제고하기 위해 Landsat 위성영상으로부터 실제 벼농사가 이루어지는 픽셀만 선별하였으며(Koo *et al.*, 2001), 벼논픽셀을 하나라도 포함하는 시군행정구역을 생육모의를 위한 공간단위 즉 재배구역단위(Cultivation Zone Unit, CZU)라고 부르기로 하였다. 모든 CZU는 국립지리원에서 발간한 1:250,000 행정구역도 상에서 확인하고 수치지도화 작업을 거쳐 중부원점(동경127도, 북위 38도)의 TM좌표계에 투영시킨 ArcView(ESRI Inc., USA) Shape 파일로 저장하였다. Koo *et al.*(2001)의 방법대로 추출된 벼논픽셀을 기준평년 기후도에 중첩시키고, 행정구역별로 벼논픽셀에 해당하는 기후값만을 선별하여 평균값을 구하였다. 이들 CZU 대표 기후값은 월별평균값으로서, 작물모형 입력을 위해서는 일별 자료로 변환시켜야 한다. 기후란 평균뿐 아니라 그 변이를 함축한 의미로서 농업적으로는 특히 연차변이가 중요하다. 앞서 작성된 재배구역별 기후 평균값은 1971-2000년, 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 등 30년씩의 기후를 대표하지만, 각 기간별 기후값 30개를 산술적으로 평균한 값에 불과하므로 실제 30년 동안 겪었던 기후의 연차변이에 대해서는 어떤 정보도 제공하지 않는다. 이러한 결점을 보완하고 현실감 있는 일 기상자료를 도출하기 위해 여러 가지 통계학적 기법이 이용되어 왔는데, 본 연구에서는 Pickering *et al.*(1994)에 의해 제시된 방법에 따라 각 재배구역별로 1971-2000년 및 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 기간의 “통계학적인 일 기상자료”를 무작위로 생성하였다.

2.3 자포니카형 벼 성장모형

2.3.1 발육단계 추정

벼의 발육은 출엽과 밀접한 관계가 있는데, 출수까지의 기간은 이 기간 중에 나오는 총엽수와 개개 잎의 출엽간격에 의하여 결정된다. Lee *et al.*(2001a)에 의하면 온도에 대한 출엽반응은 Logistic 함수에 의해 표현할 수 있으며(식 1), 벼의 최종엽수(final number of leaves, FNL)에 영향을 주는 환경요인이 일장(day length, DAL)일 것으로 판단하고, 최종엽수 추정식을 일장함수로 설정하였다(Lee *et al.*, 2001b, 식 2).

$$\frac{dL}{dt} = (T_i - 10) \cdot -a^{-1} \cdot b^{\frac{1}{c}} \cdot c \cdot (a - L)^{\frac{c-1}{c}} \cdot L^{\frac{c+1}{c}} \quad \text{----- (식 1)}$$

여기서 T_i 는 일평균기온, L 은 출엽수이고, a , b , c 는 출엽속도 모델의 계수이다.

$$FNL = a + b \cdot \exp[c \cdot (DAL - 13.0)] \quad \text{----- (식 2)}$$

여기서 a , b , c 는 최종엽수 추정모델의 계수이다.

이 두 식을 결합한 출수기 예측모형의 조중만생 대표 품종인 오대벼, 화성벼, 동진벼의 모수는 이미 추정되어있다(Table 1 and 2).

2.3.2 수량구성요소 추정

한계질소농도(Critical Nitrogen Concentration, N_c)곡선으로부터 질소영양지수(Nitrogen Nutrition Index, NNI)를 계산할 수 있는데, Cui *et al.*(2002)은 Japonica 계열과 통일계열 품종간의 한계질소농도 곡선에는 차이가 없으며, $N_c = 5.19W^{-0.4256}$ ($R^2 = 0.9637$)으로 표현할 수

있다고 하였다. 또한 Lee *et al.*(2006)은 NNI를 이용하여 질소결핍정도를 나타내는 다양한 지표들을 표준화하여 질소영양상태에 따른 수당 영화수의 변화를 검증하고(식 3), Bum *et al.*(2006)은 Japonica 계열과 통일계열 품종간의 광이용효율(Radiation Use Efficiency, RUE)과 건물생산성과의 관계를 설명하였다. 이로부터 작성한 영화수 추정식과 엽생장 추정식을 CERES-Rice의 구성모듈로 결합하였다.

$$RUE = RUE_{max} \cdot (1 - \exp(-1.11 \cdot NNI - 0.35)) \text{ ----- (식 3)}$$

여기서 $RUE_{max} = 7.01 - (3.72 \cdot \text{LOG}_{10}(DW))$ 이고, $NNI = \frac{N_{act}}{N_c}$ 이다.

온도에 따른 출엽속도와 일장에 따른 최종엽수를 감안한 출수기 예측모듈과, 한계질소 농도와 NNI 기반의 다양한 지표에 의한 영화수 추정 및 엽생장 모듈이 결합된 CERES-Rice는 기존모형에 비해 자포니카형 벼의 생육모의에 적합한 것으로 확인되었으므로 "CERES-Japonica"로 명명하였다.

Table 1. Estimated parameters of the equation for accumulated temperature and leaf appearance rate

Variety	Estimated parameter		
	a	b	c
Odaebyeo	19.2370	2258.9408	-1.2237
Hwasungbyeo	21.7508	3668.3946	-1.2901
Dongjinbyeo	21.8196	3179.6060	-1.2668

Table 2. Estimated parameters of the equation for final number of leaves in photoperiod sensitive phase

Variety	Estimated parameter		
	a	b	c
Odaebyeo	13.0518	-0.0265	0.6527
Hwasungbyeo	14.5681	0.0187	2.6582
Dongjinbyeo	14.8678	0.0155	2.7156

2.3.3 토양 및 재배관리

작물모형에서 요구하는 토양자료는 생육모의 직전의 양분함량, 토성, 보수력, 그리고 포장의 지형정보이며, 모의에 이용되는 작토층의 토심 및 토층의 수는 사용자가 선택할 수 있다. 본 연구에서는 농촌진흥청에서 발간한 정밀수치토양도 위에, 앞서 작성한 벼논 피복 주제도를 중첩시켜 벼논픽셀에 해당하는 논토양 정보를 추출하고, 유효수분최저한계와 유효수분최대한계를 자세하게 추정하기 위해서 "유효수분 조건표"를 참고하여 작성하였다(Ritchie *et al.*, 1990). 준비된 토양, 기상, 재배관리정보를 작물모형에서 요구하는 형식으로 편집하고(Table 3), 모수조정이 끝난 벼 생육모형(CERES-Japonica)에 입력시켰다. 한 개 CZU를 대상으로 조생(오대벼), 중생(화성벼), 만생(동진벼) 3개 품종의 생육을 모의하였다.

2.3.4 모형의 신뢰성

작물과학원(수원)의 이앙기-질소시비실험자료(2002-2004년)로부터 이 모형의 신뢰성을

검증하였는데, 이앙시기를 달리한 실험(5월 10일, 5월 20일, 5월 30일, 6월 9일)과 질소시비를 달리한 실험(5, 7, 9, 11, 14, 17kg/a)에 따른 오차분석을 위해 추정오차의 산술평균(mean error, ME), 오차절대값의 평균(mean absolute error, MAE), 그리고 오차평방근의 평균(root mean square error, RMSE)을 상호 비교하였으며, 상관관계(R^2)를 살펴보았다. 출수기(heading date)의 경우, 이앙기를 10일 간격으로 달리한 실험에서 대체로 모델값(observed)과 실측값(estimated)이 유사한 경향을 보였다. 출수기의 오차평방근의 평균이 평균적으로 각각 오대벼는 2일, 화성벼는 1일, 동진벼는 3일의 값을 타나났고, 상관관계 (R^2)는 오대벼 0.96, 화성벼 0.97, 동진벼 0.95로 우수하였다(Fig. 1 and Table 4). 질소시비량을 달리한 실험에서 출수기는 대체로 모델값과 실측값이 1:1선에 근접한 경향을 보였으나, 오대벼의 경우 평균 RMSE=3.3일 및 $R^2=0.58$ 로 화성벼(RMSE=1일)와 동진벼(RMSE=2일)보다 뒤떨어진 경향을 보였다(Fig. 1 and Table. 5). 성숙기(maturity date)는 동진벼의 경우 RMSE=16일 및 $R^2=0.4$ 로 모델값이 실측값보다 다소 지연하는 경향을 보였다. 그러나 오대벼($R^2=0.95$ /RMSE=7일)와 화성벼 ($R^2=0.87$ /RMSE=11일)는 전반적으로 유사한 경향을 보이며, 상관관계가 양호하였다. 이와 같이 출수기는 세 품종의 RMSE가 1-3일로 모델값이 실측값에 상당히 유사한 경향을 보였고 성숙기의 경우, 세 품종의 RMSE가 각각 7일(오대벼), 11일(화성벼) 및 16일(동진벼)로 동진벼의 경우 예측성이 다소 떨어지나 전반적으로 발육단계를 양호하게 묘사하는 것으로 판단된다(Fig. 2 and Table 4). 엽령(leaf age)과 분얼수(tiller number)의 모델값은 오대벼, 화성벼 및 동진벼 모두 실측값에 비해 과다 추정했으며, 특히 화성벼와 동진벼의 경우 과다추정의 정도가 컸다. 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)의 모델값의 경우, 초반기에는 실측값에 비해 과다 추정을 하였지만 후반기에는 빠르게 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 오대벼, 화성벼 및 동진벼의 엽과 줄기 건물중(dry weight)은 대체로 모델값이 실측값과 유사한 경향을 보였다. 총건물중의 경우 모델값이 실측값에 비해 과소 추정하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이와 같은 모델의 성장단계 과소추정은 전반적으로 수량의 과소추정에서도 영향을 준 것으로 판단된다(Fig. 3). 또한 이앙시기에 따른 수량(yield)은 조생종 오대벼의 경우 10a당 평균 52kg, 중생종 화성벼는 79kg, 만생종 동진벼가 123kg의 차이를 보였으며, 질소시비에 따른 수량은 평균 84kg(오대벼), 62kg(화성벼), 167kg(동진벼)으로 나타나 모델에 의한 수량이 실측 수량에 비해 과소 추정되었다. 따라서 종합해보면 이앙시기와 질소시비에 따라 만생종 동진벼의 경우 출수기와 생리적 성숙기 예측이 비교적 양호하며, 조생종 오대벼와 중생종 화성벼는 출수기와 생리적 성숙기뿐만 아니라 수량면에서도 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.

Table 3. Management conditions for simulation of CERES-Japonica

Transplant age	Fertilizer (N-P-K, kg/ha)	No. of planting(hill)	Transplanting interval(cm)	Irrigation management
30	110-70-80	3	30	non-stress (Automatic)

* Level of CO₂ concentration: 330ppm (same as the present), Base line temperature for transplanting: 15°C(Yun and Lee, 2001)

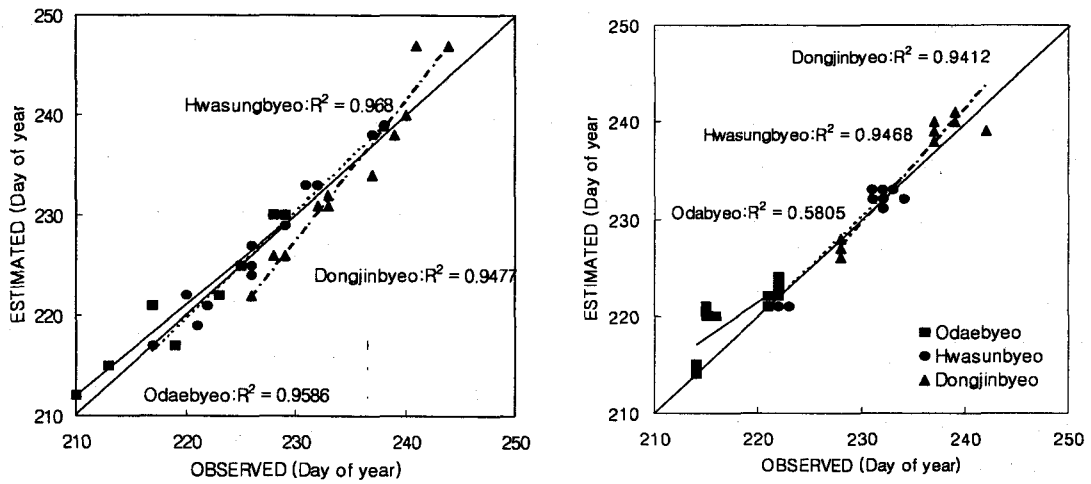


Fig. 1. Comparison between simulated and observed heading dates under different transplanting dates (left) and different nitrogen fertilization rates experiments (right) of 3 maturity groups in Japonica rice over a period of three years (2002-2004).

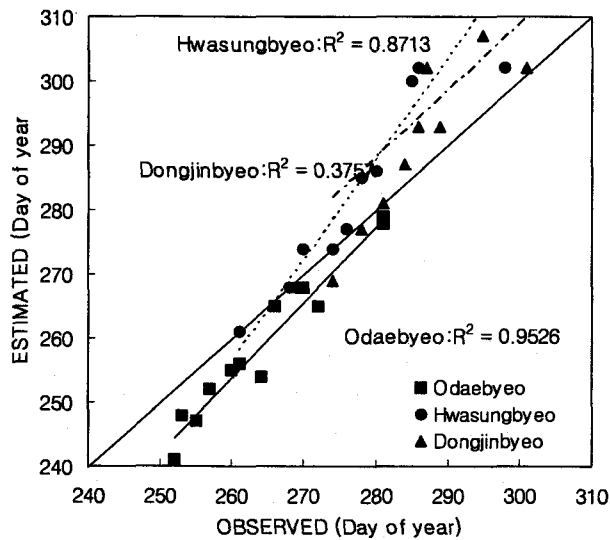


Fig. 2. Comparison between simulated and observed physiological maturity under different transplanting dates experiment with 3 Japonica cultivars over a period of three years (2002-2004).

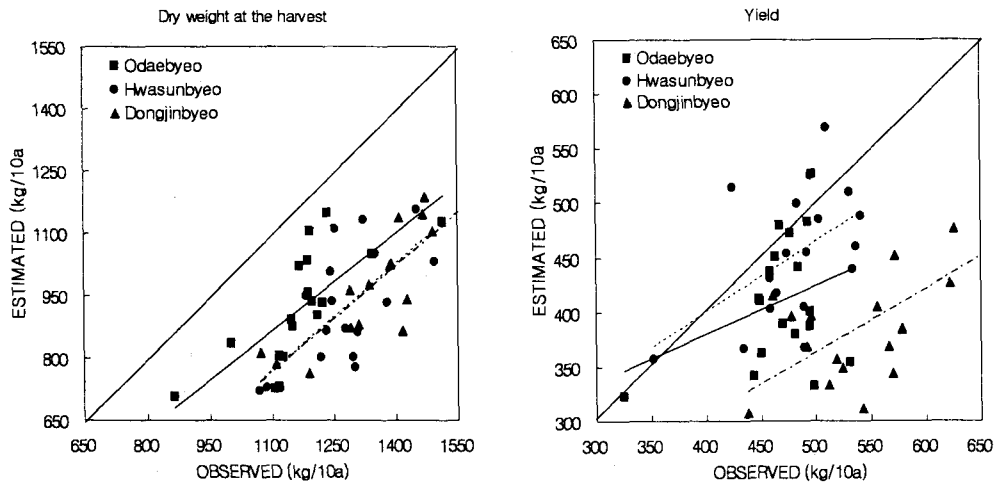


Fig. 3. Comparison between estimated and observed dry weights (left) and yields (right) under different nitrogen fertilizer content experiments of 3 cultivars over a period of three years (2002-2004).

Table 4. Heading date, physiological maturity, and yield under different transplanting date methods of 3 cultivars in Japonica rice grown in Suwon during 2002-2004

Variety	Treatment	Heading date(day)			Physiological maturity(day)			Yield (kg/10a)		
		ME	MAE	RMSE	ME	MAE	RMSE	ME	MAE	RMSE
Odaebyeo	T510	-2	2	2	7	7	8	1	14	16
	T520	-2	2	2	6	6	6	48	48	53
	T530	0	2	3	6	6	7	32	32	40
	T609	-1	1	1	2	2	2	62	62	73
Hwasungbyeo	T510	0	1	2	-1	1	2	-25	36	39
	T520	0	1	1	-2	2	4	-11	18	19
	T530	0	2	2	-10	10	13	-15	23	34
	T609	-1	1	1	-13	13	17	132	132	141
Dongjinbyeo	T510	3	3	3	0	3	4	16	36	47
	T520	2	2	2	-7	8	10	59	59	63
	T530	0	1	1	-16	16	25	30	33	39
	T609	-3	3	4	-11	11	13	88	88	91

*T: Transplanting, 510, 520, 530, 609 mean dates of transplanting

3. 결과 및 고찰

3.1 재배구역단위별 기준평년 기후자료 공간평균

벼 성장기간(5월-10월) 동안 시군 행정구역에서 벼논픽셀에 해당하는 기후값의 평균 (spatial mean of site-specific values)과 시군 전체 평균기후값(original)을 비교해 보았다. 시군 전체평균 기후값은 벼 재배지역 외에 숲과 도심에서 나타나는 기후값이 혼합되어 있기 때문에 실제 벼 재배지의 기후값과는 다를 수 있다. 영월, 횡성, 봉화, 문경, 장수와 같

은 강원도와 경상북도 산간지역의 일 최고 및 최저기온의 경우 시군 전체평균 기후값이 벼논 기후값보다 낮는데, 그 이유는 북부 산간지역 기온은 고도와 산악지형 효과에 의해 벼논이 존재하는 평야지보다 낮기 때문이다. 반면 여주, 남원, 수원과 같은 해안지역과 수도권 인근 평야지에서는 시군 전체평균 기온이 벼논픽셀 기후값보다 높는데, 이는 낮은 지형과 도시열섬효과로 시군 전체 기후값이 실제 벼군락의 기후값보다 높아지기 때문이다.

Table 5. Heading date, and yield under different nitrogen fertilizer control methods of 3 cultivars in Japonica rice grown in Suwon during 2002-2004

Variety	Treatment	Heading date(day)			Yield(kg/10a)		
		ME	MAE	RMSE	ME	MAE	RMSE
Odaebyeo	N5	-1	1	2	90	90	112
	N7	-2	2	3	115	115	123
	N9	-2	2	3	82	82	88
	N11	-2	2	4	59	59	64
	N14	-3	3	4	13	13	15
	N17	-3	3	4	-10	18	20
Hwasungbyeo	N5	1	1	1	62	65	81
	N7	0	1	1	63	63	65
	N9	0	0	1	53	53	61
	N11	-1	1	1	28	38	47
	N14	-1	1	1	14	34	37
	N17	-1	1	1	-42	57	63
Dongjinbyeo	N5	1	2	2	179	179	183
	N7	0	1	1	185	185	188
	N9	-1	1	1	184	184	185
	N11	-1	1	1	146	146	150
	N14	-1	2	2	147	147	152
	N17	-2	2	2	88	88	96

*N: Nitrogen fertilizer, 5, 7, 9, 11, 14, 17 are total nitrogen fertilizer contents

3.2 기후변화 시나리오 공간분해능 개선

2011-2100년 동안 일 최고기온은 2011-2100년 동안 전국적으로 약 20-33°C의 분포를 보였으며, 일 최저기온은 8-24°C의 분포를 보였다. 일 최고기온 및 최저기온 모두 먼 미래로 갈수록 승온효과가 지역적으로 상세하게 반영되었으며, 태백산맥 및 소백산맥 등과 같이 해발고도가 높은 저온지대가 2011-2100년 동안에 이미 2011-2040년 동안 평야지와 도심지역에서 보여주었던 수준의 기온분포를 보였다.

3.3 기후변화 시나리오에 따른 품종별 성장과 발육

3.3.1 출수기

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 출수기가 Fig. 6이다. 조생종 오대벼의 출수기는 중부지방에서 8월 초(최초 8월 3일)에 출수를 시작하여 남부지방에서는 8월 중순이면 대부분 출수되었으며, 태백시와 평창군의 출수가 가장 늦었다. 중만생종 화성벼와 동진벼는

강원도와 중부지방에서 8월 중순(최초 8월 16일)에 대부분 출수되었으며, 태백산맥의 산간 지역 출수가 지연되었다. 1971-2000년 평년기후도에서 모의된 출수기를 기준출수기로 두고 미래 3시기의 출수기 변화를 비교해보면, 3품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 출수기가 일주일 정도 빨라지고, 먼 미래 (2071-2100년)에는 최대 20일까지 단축될 수 있다.

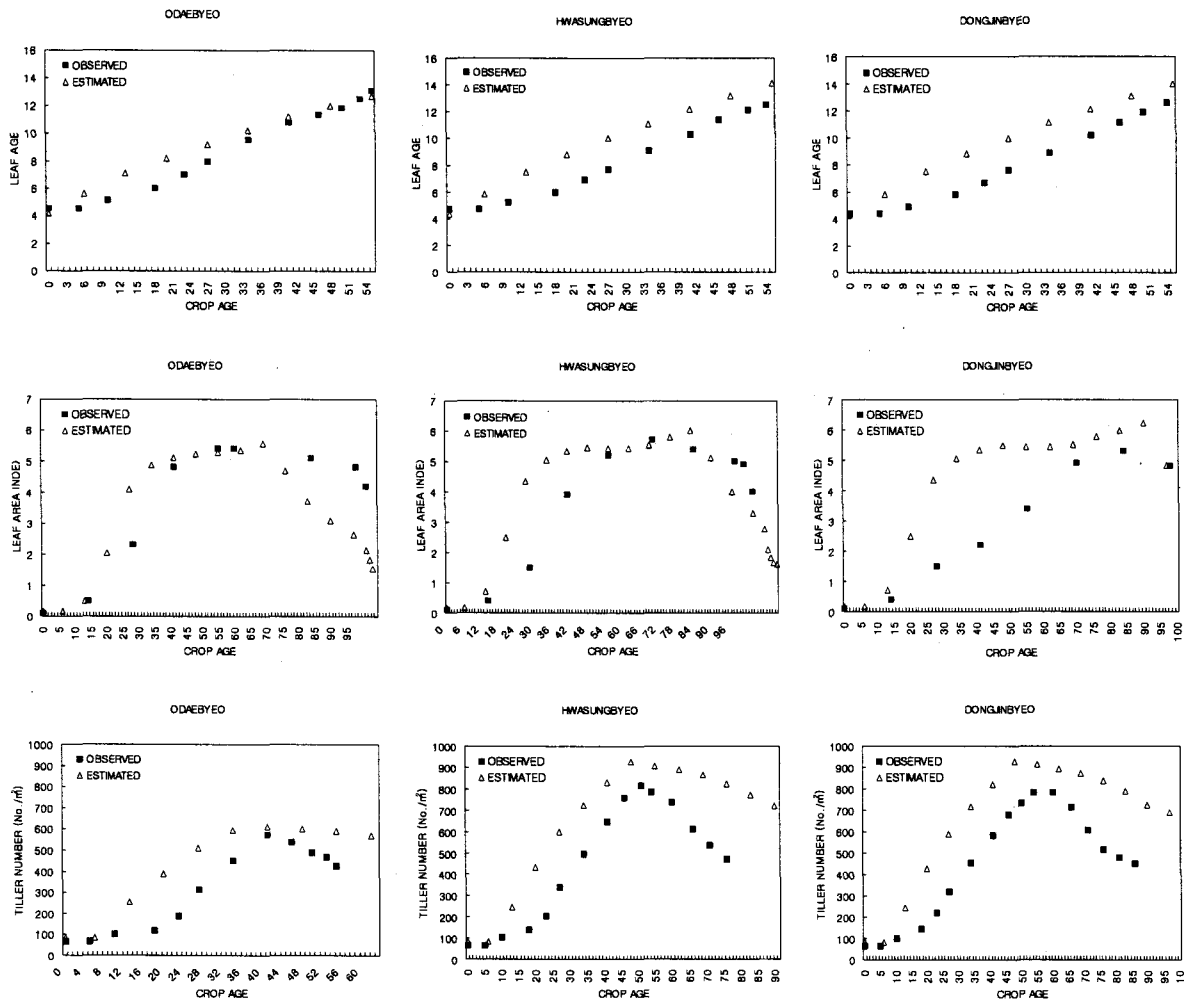


Fig. 4. Comparison between estimated and observed leaf age (top), leaf area index (middle) and tiller number (bottom) of 3 maturity groups in Japonica rice (left:Odaebyeo, middle:Hwasungbyeo, right:Dongjinbyeo, ■:observed, △:simulated).

3.3.2 생리적 성숙기와 등숙기간

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 성숙기를 보면(Fig. 6) 조생종 오대벼의 생리적 성숙기는 9월 중순(최초 9월 13일)부터 시작하여, 10월 중순까지 진행되었고, 중만생종 화성벼와 동진벼는 9월 말(최초 9월 25일)부터 시작하여 출수 이후 평균적으로 45일이 경과되었을 때 생리적 성숙이 이루어졌다. 생리적 성숙기의 지역적 분포는 출수기와 같이 출수가 빠른 곳에서 생리적 성숙기의 도달도 빨랐으며, 출수가 지연된 지역에서는 생리적 성숙기도 늦었다. 기준평년의 생리적 성숙기에 비해 미래 평년 성숙기는 3품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 15일 정도 단축되고, 먼 미래(2071-2100년)에는 최대 한달까지도 빨라질 수 있어, 출수기에 비해 단축정도가 심하다.

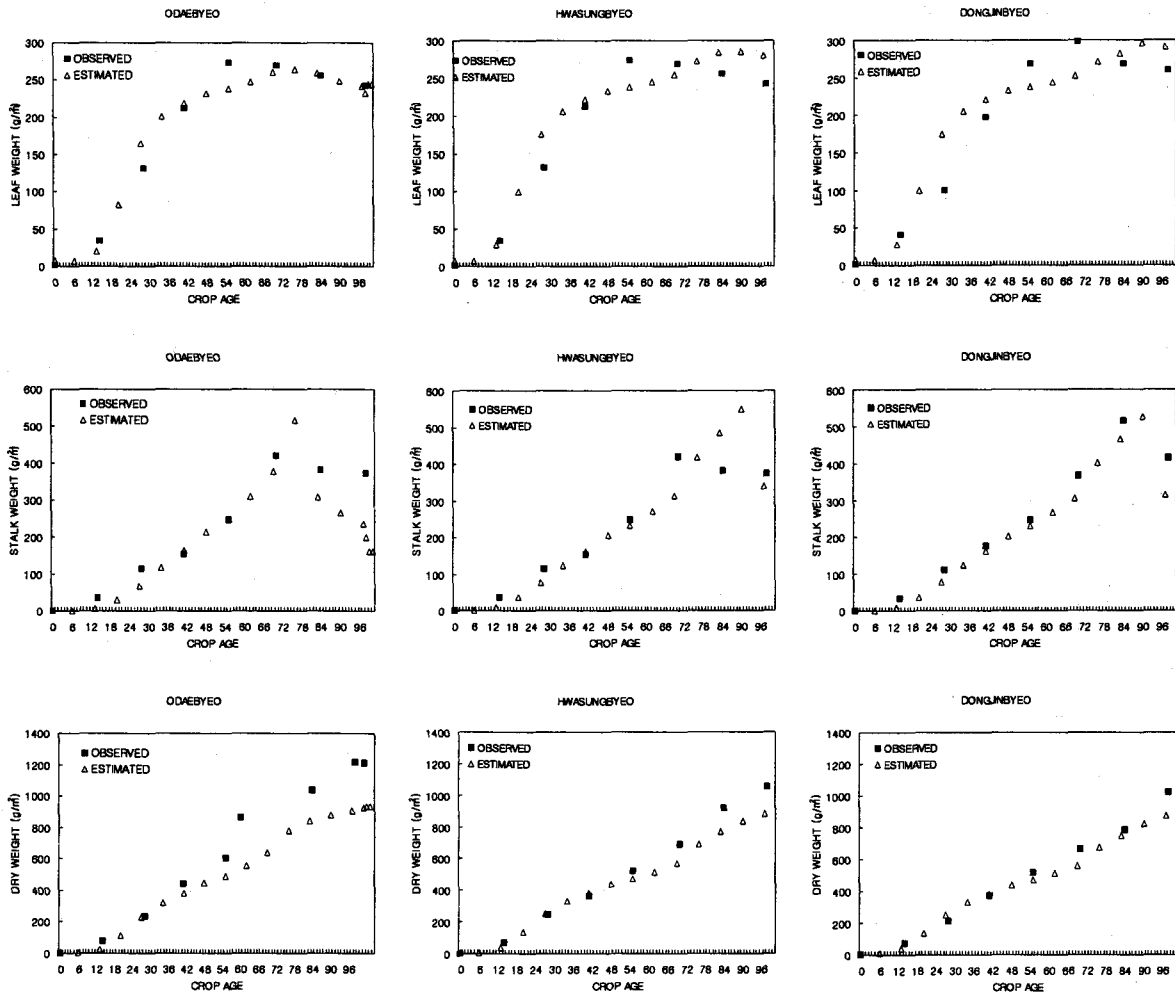


Fig. 5. Comparison between estimated and observed leaf (top), stem (middle) and shoot dry weight (bottom) of 3 maturity groups in Japonica rice (left:Odaebyeo, middle:Hwasungbyeo, right:Dongjinbyeo, ■:observed, △:simulated).

3.3.3 품종별 수량과 수량구성요소 변화

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 수량을 보면, 조생종 오대벼는 강원도가 평균 10a 당 450kg, 경상도와 전라도가 470kg, 경기도와 한강 이남이 380kg이다. 중생종 화성벼는 강원도가 평균 510kg, 경상도와 전라도 500kg, 경기도와 한강 이남 410kg이며, 만생종 동진벼는 강원도, 경상도와 전라도 510kg, 경기도와 한강 이남이 420kg이다. 기준평년의 기후조건에서 모의된 수량구성요소와 미래 3개 평년을 비교해 보면, 등숙률의 경우 중만생종 화성벼와 동진벼의 등숙률 저하가 현저하였으며, 수량에 큰 영향을 미치는 이삭수의 감소도 중만생종에서 크게 나타났다. 또한 수량에서는 조생종인 오대벼의 경우 10a당 6-25%, 중생종 화성벼의 경우 3-26%, 만생종 동진벼는 3-25%까지 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

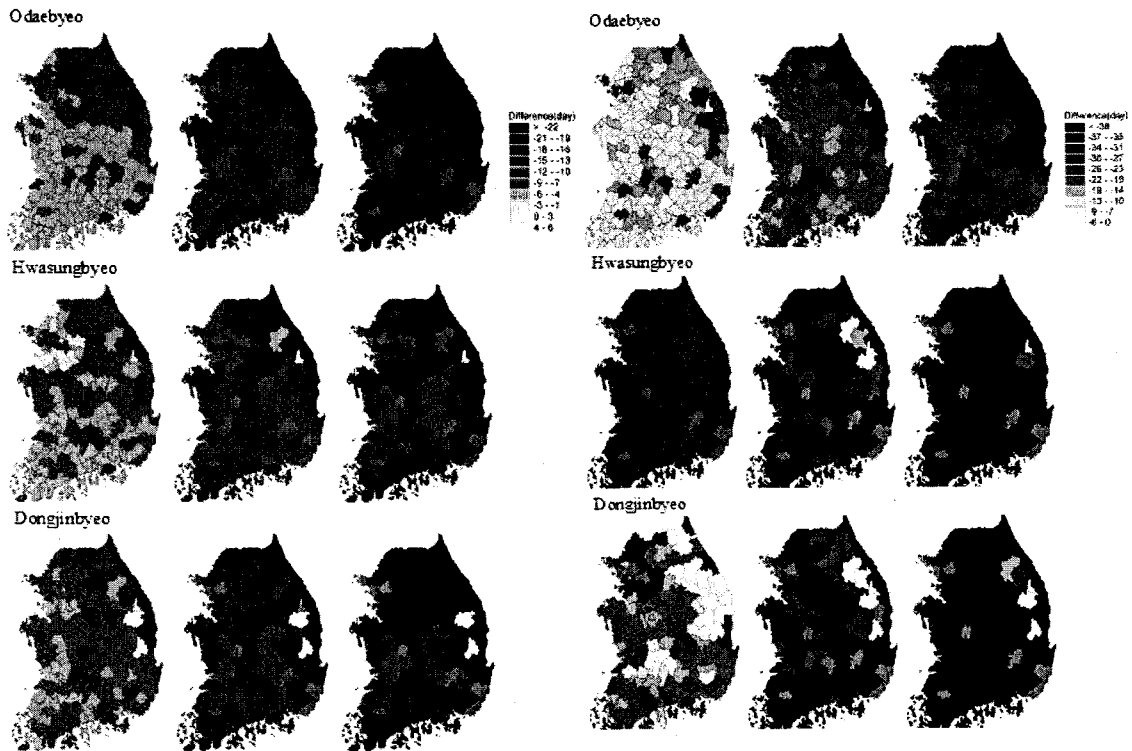


Fig. 6. Changes in heading (left panel) and physiological maturity (right panel) dates of 3 maturity groups in Japonica rice grown under the projected climate during 2011-2100.

3.4 고찰

해안지역과 수도권 인근의 재배구역단위별 평균기온이 시군 전체 평균기온보다 낮고, 강원도와 경상북도 산간지역의 재배구역단위별 평균기온이 시군 전체 평균기온보다 높게 추정되었다. 이는 지형효과와 도시열섬효과를 동시에 고려한 정밀기온자료를 제작하였으며, 순수하게 벼논에 해당하는 픽셀의 기온자료만 선발함으로써 현실감을 높인 결과라 할 수 있다. 작물은 지역의 기후특성을 잘 반영하는 기후경관 중 하나이다. 그 지역의 기후 특성에 알맞은 작물은 생육이 활발한 반면 기후조건에 맞지 않으면 생육이 불량하며 생산성도 낮다. 조생종은 대체로 태백산맥과 소백산맥을 중심으로 비교적 고도가 높은 곳에 분포하여, 강원도 대부분 지역과 경기북부 연천과 포천 일대에서 재배면적이 많다. 하지만 조생종이라고 해서 산간지에서 생육이 양호하다는 뜻은 아니다. 1971-2000년 평년기후 조건에서 모의된 태백시와 평창군의 오대벼 생육은 다른 재배지역에 비해 불량하였는데, 해발고도 700m가 넘는 이들 지역의 산지기후조건은 오대벼의 생육에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 온난화시나리오 조건에서 생육을 모의한 결과 이 지역은 조생종뿐만 아니라 중만생종의 발육속도가 빨라지고, 수량 또한 증가하였는데 이는 산지기후가 온난화시나리오에 의해 가장 큰 변화를 겪을 수 있음을 보여준다. 반면 다른 지역에서는 3 품종 모두 발육속도가 빨라지면서 생육기간이 단축되어 생산성이 감소하였다. 이는 온난화로 인한 등숙기간의 단축뿐 아니라 고온에서의 임실을 저하(Shim *et al.*, 2005), 그리고 야간고온에 의한 호흡손실 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 지역별 정밀기후 추정과 이에 근거한 최적품종의 선택, 이앙기 및 수확기 등 생육기간의 조절이 온난화 대응기술로서 유효할 것으로 기대된다.

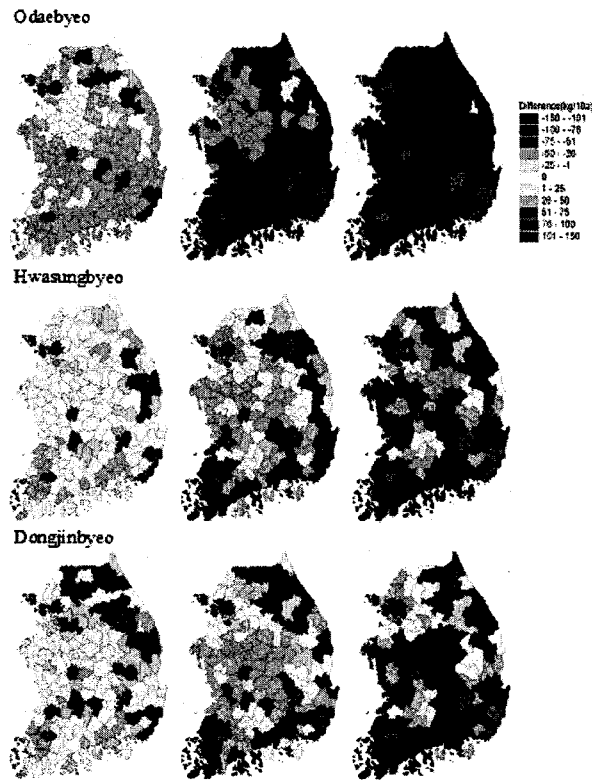


Fig. 7. Changes in grain yield of 3 maturity groups in Japonica rice grown under the projected climate during 2111-2100.

인용문헌

- 기상연구소, 2003: 온실가스 증가로 인한 한반도 주변의 기후변화 탐지. 온실가스 저감기술개발사업 최종보고서, 380pp.
- 기상연구소, 2004a: 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출 기술 개발(III), 510pp
- 기상연구소, 2004b: 한국의 기후, MR044C30.
- 권원태, 2004: 기후변화와의 과학적 현황과 전망. 환경부-기상청-한국기상학회 공동주관 제 2차 기후변화학술대회 초록집 I-4. (2004년 11월 18-19일, 대구).
- 최광용, 권원태, 2001, 20세기 우리나라 자연 계절 전이와 생활 기온 지수의 변화, 지리교육논집, 45, 14-25.
- 서형호, 2005: 기후변화가 과수 재배에 미치는 영향, 제 3차 기후변화 학술 대회 및 제 2차 기후변화 정책 포럼 기념집, 33-37.
- 이승범, 신경섭, 조영순, 손승희, 2003: 식물 계절에 나타난 한반도 기후 변화 영향, 대기 지, 13(1), 468-471.
- 이승호, 이경미, 2003: 기온변화에 따른 벚꽃 개화 시기의 변화 경향, 한국환경영향평가지, 12(1), 45-54.
- 최광용, 권원태, 2003: 남한의 식물 기후 주기 변화, 2003년 대한지리학회 춘계대회 초록집, 75-78.

-
- Bum, Y., K. J. Lee, and B. W. Lee, 2006: Comparison of traits related to dry matter production and grain yield among rice cultivars released in different years. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(3), 183-189.
- Choi, J. Y., U. Chung, and J. I. Yun, 2003: Urban-effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* **42**(12), 1711-1719.
- Choi G., Kwon W.-T., Robinson D.A., 2004, "Changes of Seasonality and Phenological Cycles in South Korea", *The proceeding of the 84th Annual Meeting of the American Meteorological Society (Introduced to Bulletin of the American Meteorological Society)*.
- Cui, R. X., M. H. Kim, J. H. Kim, H. S. Nam, and B. W. Lee, 2002: Determination of critical nitrogen concentration and dilution Curve for rice growth. *Korean Journal of Crop Science* **47**(2), 127-131.
- Dodson, R., and D. Marks, 1997: Daily temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research* **8**(1), 1-20.
- Gallo, K. P., J. O. Adegoke, T. W. Owen, and C. D. Elvidge, 2002: Satellite-based detection of global urban heat-island temperature influence. *Journal of Geophysical Research (D: Atmosphere)* **107**, ACL16-1-ACL16-6.
- Gallo, K. P., and T. W. Owen, 1999: Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *Journal of Applied Meteorology* **38**(6), 806-813.
- Hansen, J., W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, T. Karl, R. Ruedy, M. Sato, and M. Imhoff, 2001: A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research (D: Atmospheres)* **106**(20), 23947-23963.
- Koo, J. M., S. Y. Hong, and J. I. Yun, 2001: A simple method for classifying land cover of rice paddy at a 1 km grid spacing using NOAA-AVHRR data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(4), 215-219.
- Lee, C. K., B. W. Lee, Y. H. Yoon, and J. C. Shin, 2001a: Temperature response and prediction model of leaf appearance rate in rice. *Korean Journal of Crop Science* **46**(3), 202-208.
- Lee, C. K., B. W. Lee, J. C. Shin, and Y. H. Yoon, 2001b: Heading date and final leaf number as affected by sowing date and prediction of heading date based on leaf appearance model in rice. *Korean Journal of Crop Science* **46**(3), 195-201.
- Lee, D. Y., M. H. Kim, K. J. Lee, and B. W. Lee, 2006: Changes in Radiation Use Efficiency of rice canopies under different nitrogen nutrition status. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(3), 190-198.
- Lobell, D. B., and G. P. Asner, 2003: Climate and management contributions to recent trends in US Agricultural Yields. *Science* **299**, 1032.
- Nalder, I. A., and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**(4), 211-225.
- Peng, S., Huang, J., sheehy, J.E., Laza, R.C., Visperas, R.M., Zhong, X., Centeno, G.S., Khush, G.S., Cassman, K.G., 2004: Rice yields decline with higher night temperature from

-
- global warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **101** (27), 9971-9975.
- Peterson, T. C., A. Huang, D. A. Mckittrick, K. P. Gallo, J. Lawrimore, and T. W. Owen, 1999: Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* **26**(3), 329-332.
- Pickering, N. B., J. W. Hansen, J. W. Jones, H. Chan, and D. Godwin, 1994: WeatherMan: a utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal* **86**, 332-337.
- Ritchie, J. T., D. C. Godwin, and U. Singh, 1990: Soil and weather inputs for IBSNAT crop models. In: *Proceedings of IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. University of Hawaii, Honolulu, USA.
- Shim, K. M., J. T. Lee, Y. S. Lee, and G. Y. Kim, 2004: Reclassification of Winter Barley Cultivation Zones in Korea Based on Recent Evidences in Climate Change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 218-234.
- Shim, K. M., Y. S. Lee, Y. K. Shin, K. Y. Kim, and J. T. Lee, 2005: Changes in simulated rice yields under GCM 2×CO₂ climate change scenarios. *Proceedings of the 8th Conference on Agricultural and Forest Meteorology* (Sangju University, Korea, 29-30 September 2005) 88-92.
- Yun, J. I., and K. H. Lee, 2000: Agroclimatology of North Korea for paddy rice cultivation : Preliminary results from a simulation experiment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(2), 47-61.
- Yun, J. I., 2003: Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems* **77**(1), 23-38.
- Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 272-289.
- Yun, S. H., and J. T. Lee, 2001: Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(1), 55-70.